

Aus dem Physiologischen Institut der Johannes-Gutenberg-Universität

in Mainz

(Direktor Prof. Dr. Dr. H. Schriever)

Über das Richtungshören,
insbesondere den Pohl'schen
Schlauchversuch

Inauguraldissertation
zur
Erlangung der Doktorwürde
der
hohen medizinischen Fakultät
der
Johannes-Gutenberg-Universität
in Mainz



vorgelegt von
Gerfried Kleinhanß
1957

D e k a n :

Prof. Dr. U. K ö t t g e n

Referent:

Prof. Dr. Dr. H. S c h r i e v e r

Datum des Diploms 20. Dez. 1957

Zur Stütze der Zeit-Theorie des Richtungshörens hat R.W. P o h l ¹⁾ folgenden Versuch angegeben: "Man hält sich die beiden Enden eines etwa 2 m langen Gasschlauches in die Ohren und läßt einen Helfer auf den Schlauch klopfen. Die Schallrichtung weicht von der Medianebene des Kopfes ab, wenn die Klopfstelle um mehr als 0,5 cm von der Schlauchmitte entfernt liegt. Der Hörsinn reagiert also schon auf Laufzeitdifferenzen $\Delta t = 3 \cdot 10^{-5}$ sec. Bei $\Delta t = 60 \cdot 10^{-5}$ sec. (entsprechend 20 cm Wegdifferenz, Kopfdurchmesser) lokalisiert man die Schallquelle quer zur Medianebene".

Der Versuch ist sehr einfach und bei erstem Erleben bestechend. Befaßt man sich aber näher mit ihm, findet man allerlei Unstimmigkeiten. So z.B. ist das der Fall, wenn man den Schlauch verschieden l a n g nimmt. Mit wachsender Schlauchlänge steigen, wie auch schon von Skramlik ²⁾ gefunden hat, die in Millimeter gemessenen Schwellen an. Doch nimmt dann nicht auch die Schalleitungsgeschwindigkeit in dem Schlauch zu; vielmehr bleibt diese dieselbe oder nimmt gar ab ³⁾. Wir finden hier also s t e i g e n d e, in Millimeter gemessene Schwellen bei g l e i c h b l e i b e n d e r oder a b n e h m e n d e r Schalleitungsgeschwindigkeit, d.h. mit wachsender Schlauchlänge zunehmende Zeitlaufdifferenzen, was der Erklärung bedarf. Ähnliche Unstimmigkeiten trifft man bei verschieden weiten Schläuchen an und bei Schläuchen, in die man statt Luft irgend welche Gase gefüllt hat. Insbesondere findet man auch da ceteris paribus andere Laufzeitdifferenzen, die zu erklären sind.

Zu Feststellungen solcher Art sind wir hier im Institut nach und nach gekommen, seitdem der Versuch in das "Physiologische Praktikum" aufgenommen wurde. Doch sind hier weitere Untersuchungen sehr erwünscht. Ich bin so gern einer Anregung von Herrn Prof. Schriever gefolgt, mich mit dem Schlauchversuch erneut zu befassen und über die bei diesen Untersuchungen erhaltenen Ergebnisse soll dann im Folgenden kurz berichtet werden.

I. Versuchsserie.

Schallerzeugung durch Aufklopfen auf den Schlauch.

In einer ersten Versuchsserie änderte ich systematisch die einzelnen Versuchsbedingungen wie Länge, Weite, Materialbeschaffenheit, Füllung des Schlauches usw., um so genauer festzustellen, in wieweit diese von Einfluss auf den Versuchsausfall sind. Noch nicht änderte ich hier aber die Art der Schallerzeugung; vielmehr erfolgte diese wie bei Pohl wieder durch einfaches Aufklopfen auf den Schlauch.

Soweit nicht anders angegeben, benutzte ich bei den Versuchen üblichen Gasschlauch von 15 mm Dicke. An den Schlauchenden befanden sich Oliven, die mittels eines federnden Metallbügels fest an die Gehörgänge gedrückt wurden, sodass ein möglichst guter Abschluss entstand. Das mittlere Schlauchstück lag für gewöhnlich fest neben einer Latte mit Millimeter-Einteilung auf einem Tisch, während die seitlichen Stücke frei in der Luft hingen. Um die genaue Schlauchmitte jederzeit leicht zu erkennen, trug diese einen fein aufgemalten Ring.

Zum Anschlagen des Schlauches diente eine dünne Nadel, die ich in einem Teil der Versuche mit der Hand, in einem anderen Teil mittels einfacher mechanischer Konstruktionen gegen den Schlauch führte; doch sah ich in letzteren kaum Vorteile. Zur streng unwissentlichen Durchführung der Versuche befand sich zwischen dem mittleren Teil des Schlauches, der von der Nadel angeschlagen wurde, und der Versuchsperson (Vp.) ein großer Schirm. Diese wurde aufgefordert für den jeweils wahrgenommenen Schall möglichst genau anzugeben, ob er aus der Medianebene oder links oder rechts davon zu kommen schien. Diesbezügliche Aussagen waren allgemein mit großer Genauigkeit möglich, und sie konnten so auch leicht zu S c h w e l l e n b e s t i m m u n g e n verwandt werden.

Bei diesen ging ich im einzelnen wie folgt vor: Nachdem in Vorversuchen festgestellt war, von welcher *u n g e f ä h r e n* Größe die Entfernungen von der Schlauchmitte waren, bei denen ein Schall noch in die Medianebene oder nach rechts oder links verlegt wurde, stellte ich eine Reihe gleichmäßig abgestufter Abstände von der Schlauchmitte auf, innerhalb deren der gesuchte Schwellenabstand lag. Bei jedem dieser Abstände wurde dann mindestens zehnmal ein Schallreiz gesetzt, in einzelnen Versuchsreihen auch zwanzigmal und mehr, je nach der gewünschten Genauigkeit der Schwellen. Die Prüfung der einzelnen Abstände erfolgte in bunter Reihenfolge. Die Aussagen der Vpn. lauteten dann jeweils: "Mitte", "Rechts" oder "Links", wobei unbestimmte Urteile immer den Mitte-Urteilen zugezählt wurden.

Zur Berechnung von Schwellen aus den abgegebenen Urteilen fanden folgende Formeln Verwendung:

$$1) S_r = (D_r + \frac{i}{2}) - \frac{r \cdot i}{n} \qquad 2) S_l = (D_l - \frac{i}{2}) + \frac{l \cdot i}{n}$$

Als Kontrollformel hatte hier noch die Gleichung

$$3) S_r = S_l = \frac{m \cdot i}{n}$$

Bedeutung. Im einzelnen sind hier: S_r die Schwelle für die sicheren Rechtsurteile, S_l die Schwelle für die sicheren Linksurteile, D_r der größte untersuchte Abstand nach rechts, D_l der größte untersuchte Abstand nach links, i das Intervall von einem untersuchten Abstand zum nächsten, n die Zahl der auf jeden Abstand entfallenden Urteile, r , l und m die Summen der insgesamt abgegebenen Rechts-, Links- und Mitte-Urteile. Die Formeln werden an dem unten in der Abb. 1 wiedergegebenen Beispiel klarer werden.

Zur Berechnung der Streuung von S_r und S_l dienten die Formeln:

$$4) St_r = \pm \frac{f_r \cdot i}{2n} \qquad 5) St_l = \pm \frac{f_l \cdot i}{2n}$$

wobei St_r die Streuung von S_r , St_l die Streuung von S_l , f_r die Summe der rechts fehlenden und irrtümlich dazugekommenen Urteile und f_l die Summe der links fehlenden und irrtümlich dazugekommenen Urteile, i das Intervall von einem untersuchten Abstand zum nächsten und n die Zahl der abgegebenen Urteile bedeuten. Auch diese Formeln werden durch das in der Abb. 1 wiedergegebene Beispiel klarer werden.

Als Vpn. waren außer dem Verfasser Assistenten des Instituts und Studenten tätig. Vor Beginn der eigentlichen Versuche wurden die Vpn. auf die von ihnen zu machenden Beobachtungen hin maximal eingeübt. Zur Aufmerksamkeitssteigerung wurde vor jeder Reizung ein kurzes vorbereitendes Zeichen gegeben. Sodann war wichtig, dass immer hinreichend Pausen zwischen die einzelnen Versuche gelegt wurden, um keine Ermüdungserscheinungen aufkommen zu lassen.

1. Allgemeines

Das allgemeine Aussehen der so durchgeführten Versuche läßt sich am besten an einem Beispiel veranschaulichen, als welches die Abb. 1 gelten möge. Auf der Abszisse sind die untersuchten Abstände von der Schlauchmitte aufgetragen, auf der Ordinate die Zahl der auf jeden Abstand entfallenden Rechts-, Links- und Mitte-Urteile. Die Abbildung kann für die hier erhaltenen Ergebnisse als typisch angesehen werden: In ihr nimmt von links nach rechts die Zahl der Links-Urteile allmählich ab, die der Rechts-Urteile zu, ohne dass aber irgendwo eine scharfe Grenze zu ziehen ist. Die Abstände bei denen einerseits *n u r* Links-Urteile und andererseits *n u r* Rechts-Urteile zu erhalten sind, liegen weit auseinander. Die Zahl der Mitte-Urteile dagegen durchläuft ein Maximum. Seiner Lage nach fällt dieses durchaus nicht immer wie hier mit dem Abstand Null, d.h. der objektiven Mitte, zusammen, vielmehr kann es auch mehr oder weniger weit rechts oder links davon liegen.

Die Abb. 2 zeigt, wie hier Schwellen berechnet sind: Als Schwelle für die Rechts-Urteile S_r ist hier der Punkt auf der Abszisse angenommen worden, bei dem die Flächenstücke zwischen der in S_r errichteten Senkrechten und der Kurve der Rechts-Urteile (in der Abb. 2 horizontal schraffiert) gleich sind. Denkt man sich das untere Flächenstück nach oben rechts umgeklappt und durch das obere Flächenstück ersetzt, so wird der Bereich der Rechts-Urteile, der von der Kurve der Rechts-Urteile, der Abszisse und der Senkrechten am rechten Ende der Abszisse umgrenzt wird, in ein Rechteck verwandelt, das bis S_r reicht (vgl. Formel 1).

Völlig entsprechend ist hier als Schwelle für die Links-Urteile S_l der Punkt auf der Abszisse angenommen worden, für den die Flächenstücke zwischen der in S_l errichteten Senkrechten und der Kurve der Links-Urteile (in der Abb. 2 senkrecht schraffiert) gleich sind. Denkt man sich das untere Flächenstück nach oben links umgeklappt und durch das obere Flächenstück ersetzt, so wird der Bereich der Links-Urteile, der von der Kurve der Links-Urteile, der Abszisse und der Ordinate umgrenzt wird, in ein Rechteck verwandelt, das bis S_l reicht (vgl. Formel 2).

Der Bereich der Mitte-Urteile, der von der Kurve der Mitte-Urteile und der Abszisse umgrenzt wird, ist hier dann gemäß Formel 3 gleich dem Rechteck zwischen S_r und S_l . Je ausgedehnter und je flacher die Kurve der Rechts-Urteile bzw. die der Links-Urteile verläuft, umso größer ist die Streuung von S_r bzw. S_l . Gleichzeitig sind dann die in Abb. 2 schraffiert gezeichneten Flächenstücke größer, die so als Maß für die Streuung verwandt werden können. Verwandelt man sie ebenfalls in Rechtecke, bei denen die eine Seite gleich der Zahl der Urteile auf jeder Stufe ist, so ist die andere Seite der hier benutzte Streuungswert (vgl. Formel 4 und 5). Allerdings ergeben diese Formeln nur Näherungswerte. Die Aufstellung genauer Formeln ist nicht schwierig, doch sind diese kompliziert und so für die allgemeine Anwendung zu unbequem. Im übrigen kommt es bei der Angabe der Streuung aber auch nicht so sehr auf letzte Genauigkeit als vielmehr auf die Größenordnung an, die anzugeben die Formeln 4 und 5 hier genügen.

In den meisten Versuchen zeigte sich die Streuung ihren absoluten Werten nach umso größer, je höher S_r und S_l waren. Doch folgte sie diesen in der Größenzunahme meistens nicht proportional, sondern langsamer, woraus folgt, dass die prozentualen Werte der Streuung bei hohem S_r und S_l kleiner waren. Darauf hinzuweisen ist hier sodann, dass die Streuungswerte gewisse individuelle Verschiedenheiten zeigten, die insofern auch mit der Grundhaltung der jeweiligen Vp. zusammenhängen, als die eine vorsichtiger als die andere urteilte. Doch waren solche individuellen Verschiedenheiten in den Werten von St_r und St_l meistens viel kleiner als man zunächst erwarten sollte.

2. Der Einfluss der Länge des Schlauches

Im weiteren berichte ich zunächst über Versuche mit Schläuchen verschiedener Länge. Wie die Tab. 1 zeigt, nehmen die Schwellen für die sicheren Rechts- und Links-Urteile (S_r und S_l) mit wachsender Schlauchlänge zuerst rasch, dann langsamer zu; gleichzeitig werden die Streuungen (St_r und St_l) größer. Der Anstieg von S_r und S_l beträgt im Mittel (siehe dazu auch Abb. 3) 213 und 164%, der Anstieg von St_r und St_l 275 und 152%.

Wenn in der Tabelle die Werte von S_r im allgemeinen kleiner als die von S_l sind, so kann man versucht sein, das darauf zurückzuführen, dass die Schlauchmitte nicht genau bestimmt gewesen ist, die bei elastischen Schläuchen bis zu 20 m Länge auf den Bruchteil eines Millimeters zu finden, ja auch nicht ganz leicht fällt. Wenn ich die Schlauchenden an den Ohren vertauschte, erhielt ich aber die gleichen Ergebnisse,

d.h. dass auch dann S_r im allgemeinen kleiner als S_l war. Der Unterschied zwischen beiden muss also eine andere Erklärung haben, und zwar dürfte das die sein, dass man auf beiden Ohren oft ungleich hört, meistens rechts besser als links, was mit der Rechts- und Linkshändigkeit zusammenhängt.

T a b e l l e 1
Einfluss der Schlauchlänge

	S_r (in mm)	St_r (in mm)	S_l (in mm)	St_l (in mm)
Versuch 1				
Schlauchlänge 2 m	8	± 3	13	$\pm 5,5$
Schlauchlänge 10 m	15	$\pm 6,3$	17	$\pm 7,7$
Schlauchlänge 20 m	17	$\pm 9,1$	23	$\pm 8,5$
Versuch 2				
Schlauchlänge 2 m	10	$\pm 3,1$	15	$\pm 7,1$
Schlauchlänge 10 m	19	$\pm 7,5$	18	$\pm 6,3$
Schlauchlänge 20 m	19	$\pm 7,6$	21	$\pm 8,1$
Versuch 3				
Schlauchlänge 2 m	6	$\pm 3,3$	11	$\pm 5,3$
Schlauchlänge 10 m	12	$\pm 7,4$	18	$\pm 9,1$
Schlauchlänge 20 m	14	$\pm 9,3$	19	$\pm 9,4$
Versuch 4				
Schlauchlänge 2 m	6	$\pm 2,5$	13	$\pm 3,5$
Schlauchlänge 10 m	14	$\pm 6,8$	15	$\pm 7,3$
Schlauchlänge 20 m	15	± 10	16	$\pm 9,3$
Mittelwerte				
Schlauchlänge 2 m	7,5	$\pm 3,2$	12,5	$\pm 5,8$
Schlauchlänge 10 m	14,5	$\pm 7,2$	17,7	$\pm 8,0$
Schlauchlänge 20 m	16,0	$\pm 8,8$	20,5	$\pm 8,8$

Wenn ich die Empfindlichkeit des einen Ohres durch Einführen eines Wattepfropfens in den einen Gehörgang künstlich herabsetzte, nahm die Ungleichheit zwischen S_r und S_l sofort stark zu, indem beide dann nämlich nach der Seite des verstopften Ohres zu abwanderten. Auch ließ sich durch Verwendung einmal eines kleineren, das andere Mal eines grösseren Wattepfropfens die Ungleichheit zwischen S_r und S_l abstufen. Auf diese Weise hat also auch direkt aufgezeigt werden können, dass die Ungleichheit zwischen diesen beiden Größen mit einem Empfindlichkeitsunterschied beider Ohren zu tun hat.

Rechnet man die in der Tab. 1 in Millimeter angegebenen Schwellen in Zeitlaufdifferenzen um — für die Schallgeschwindigkeit in dem Schlauch sind dabei immer 340 m/sec angenommen — kommt man allgemein zu etwas höheren Werten als der von Pohl gefundene. Für einen 2 m langen Schlauch gibt Pohl eine Zeitlaufdifferenz von $3 \cdot 10^{-5}$ sec. an, während ich hier im Mittel $6 \cdot 10^{-5}$ sec errechne. v. Skramlik findet in zwei verschiedenen Verfahren von Schwellenbestimmung $4,5 \cdot 10^{-5}$ und $6,75 \cdot 10^{-5}$ sec

Ohne Zweifel sind all diese Unterschiede rein methodisch bedingte, sodass ihnen keine größere Bedeutung zukommt. Anders ist das aber mit der Zunahme der Werte mit der Schlauchlänge, die etwas sehr Wichtiges ist, und auf deren Erklärung ich unten noch ausführlich zurückkommen werde.

3. Der Einfluss der Weite und Materialbeschaffenheit des Schlauches

Für Schläuche verschiedener *W e i t e* (Änderung zwischen 3 und 30 mm) und verschiedener *M a t e r i a l b e s c h a f f e n h e i t* (Änderung von ganz harten bis ganz weichen Schläuchen) war es schwierig, eindeutige Unterschiede von S_r und S_l festzustellen.

Große Unterschiede erhielt ich aber immer, wenn ich die *W e i t e* des Schlauches nur *e i n s e i t i g* änderte, derart, dass ich diesen an umschriebener Stelle mehr oder weniger zudrückte. Hierzu benutzte ich eine übliche Schlauchklemme. Ein Beispiel für die bei solch einseitiger Weitenabnahme des Schlauches erhaltenen Ergebnisse ist die Abb.4, auf der Abszisse ist die Zahl der Umdrehungen an der Schlauchklemme aufgetragen, auf der Ordinate die Größe von S_r und St_r sowie S_l und St_l . Die Abklemmung des Schlauches erfolgte in dem Fall *r e c h t s*, ca. 1/2 m vor dem Ohr. Die Abbildung zeigt, dass S_r mit abnehmender Weite der einen Schlauchseite immer größer wird; S_l dagegen wird zunächst kleiner, um darauf das Vorzeichen zu ändern und über die Schlauchmitte wegzuwandern. Ferner ist zu sehen, dass St_r und St_l mit der Abklemmung größer werden. Um den Schall in die Medianebene zu verlegen, muss man den Schlauch bei zunehmender Verengung der einen Seite folglich mehr und mehr von der Mitte weg nach der verengten Seite zu anschlagen. Über die Mitte des Schlauches, die man sonst gut erkennt, wird man durch das Abklemmen also völlig getäuscht.

4. Der Einfluss der Füllung des Schlauches

In der Tab.2 gebe ich Versuchsergebnisse wieder, die ich bei Füllung des Schlauches mit *W a s s e r s t o f f* erhalten habe. Entsprechend seiner ca. 4-mal größeren Schalleitungsgeschwindigkeit gegenüber Luft (Luft 340 m/sec, Wasserstoff 1200 m/sec) hätte man erwarten können, dass auch die in Millimeter gemessenen Schwellen ca 4-mal größer würden. Tatsächlich sind sie aber 10-fach größer und mehr! Auf eine Erklärung dafür komme ich unten noch zurück.

Füllte ich den Schlauch mit *W a s s e r* (Schalleitungsgeschwindigkeit 1200 m/sec) trat leider die Schwierigkeit auf, dass ich kein Aufklopfen auf den Schlauch mehr hörte, offenbar weil dann die Schallreflektion an der Grenze Wasser/Luft im Gehörgang zu groß war und damit keine genügenden Schallstärken mehr weitergegeben wurden.

T a b e l l e 2

Einfluss der Schlauchfüllung

(Länge des Schlauches 2 m)

	S_r (in mm)	St_r (in mm)	S_l (in mm)	St_l (in mm)
Versuch 1				
Luft	8	± 3	13	$\pm 5,5$
Wasserstoff	94	± 13	90	$\pm 10,0$
Versuch 2				
Luft	6	$\pm 3,3$	11	$\pm 5,5$
Wasserstoff	90	$\pm 12,0$	110	$\pm 12,0$
Versuch 3				
Luft	10	± 3	15	$\pm 6,1$
Wasserstoff	112	± 15	104	$\pm 11,0$
Versuch 4				
Luft	6	$\pm 2,5$	13	$\pm 3,5$
Wasserstoff	112	$\pm 14,0$	102	$\pm 10,0$
Mittelwerte				
Luft	7,5	$\pm 2,9$	13	$\pm 5,1$
Wasserstoff	102,0	$\pm 13,0$	101	$\pm 10,0$

5. Die eventuelle Miterregung des Tastsinns der Haut

Wenn man bei kurzen Schläuchen kleinere, in Millimeter gemessene Schwellen findet als bei langen Schläuchen, so kann man fragen, ob das nicht eventuell damit zusammenhängt, dass bei den kurzen Schläuchen der T a s t s i n n der H a u t mit erregt wird.

Dass die Haut der äußeren Gehörgänge zu den am besten tastempfindlichen (und kitzelempfindlichen) Stellen des Körpers überhaupt zählt, ist allgemein bekannt. Wie wir wissen, sind Empfänger für den Tastsinn an behaarten Körperstellen die die Haarbälge umgebenden Nervenkränze und an unbehaarten Stellen die Meißnerschen Tastkörperchen. Bei Kräften, die auf die Haare wirken, verhalten sich diese wie Krafthebel, und dadurch, dass die äußeren Gehörgänge nun mit langen, dicht stehenden Haaren besetzt sind, ist ihre besonders gute Tastempfindlichkeit auch schon zum Teil erklärt. Die biologische Bedeutung des in den Gehörgängen so gut ausgebildeten Tastsinns ist darin zu sehen, dass er ein Wächter über das Eindringen von Fremdkörpern in die Gehörgänge ist, und dass er so dem Schutz des Gehörorgans dient.

Dass auch bei dem Tastsinn bei beiderseitiger Einwirkung von Reizen nur sehr geringe Zeitdifferenzen genügen, um das

siehe T a b e l l e 3

T a b e l l e 3
Schwellen für Tastempfindungen
(Länge des Schlauches 4 m)

	S_r (in mm)	St_r (in mm)	S_l (in mm)	St_l (in mm)
Versuch 1	95	± 21	114	± 27
Versuch 2	101	± 26	119	± 31
Versuch 3	70	± 30	93	± 24
Mittelwerte	88	± 26	108	± 27

Wahrgenommene bald rechts, bald links zu lokalisieren, zeigt bereits folgender einfache Versuch: Steckt die Vp. die Schlauchenden nicht in den rechten und linken Gehörgang, sondern nimmt sie diese in die rechte und linke Hand zwischen die Fingerbeeren, so empfindet sie bei Anklopfen des Schlauches leichte Erschütterungen, die sie bald auf beide Seiten, bald aber nur auf die eine oder andere Seite verlegt. Für diese verschiedenen Lokalisationen bestimmte ich dann wieder Schwellen in der Art wie oben. Die in der Tab. 3 zusammengestellten Versuchsergebnisse sind alle bei gleicher Klopfstärke wie in den obigen Hörversuchen an einem Schlauch von 4 m (!) Länge gewonnen, woraus zunächst hervorgeht, dass auch noch an einem so langen Schlauch von der Mitte her kommende Erschütterungen an den Schlauchenden von dem Tastsinn gut wahrgenommen werden können. Als zweites sind in der Tabelle die niederen Schwellen von Interesse. Sie sind zwar ein mehrfaches größer als die unter ähnlichen Bedingungen über den Gehörsinn erhaltenen, immerhin aber noch von derselben Größenordnung.

Entsprechende Versuche für den Tastsinn der Gehörgänge sind wohl nur an Vpn. möglich, die taub sind, da sonst über den Gehörsinn lokalisiert wird. Solange aber nicht gezeigt ist, dass an Tauben entsprechende Versuche völlig negativ ausfallen, wird man bei kurzen Schläuchen eine mögliche Mitbeteiligung des Tastsinns bei der Schallokalisation nicht ausschließen können.

6. Die Bedeutung der Medianebene

Schließlich variierte ich den Pohl'schen Versuch noch wie folgt: Ich bestimmte S_r und St_r sowie S_l und St_l nicht nur für die M i t t e des Schlauches, sondern jetzt auch für Festpunkte, die mehr oder weniger weit r e c h t s bzw. l i n k s davon lagen. Ich fand dann, dass mit wachsender Entfernung dieser Festpunkte von der Schlauchmitte S_r und St_r sowie S_l und St_l zuerst langsam, dann immer rascher anstiegen (Abb.5). Lag der Festpunkt nicht viel über 20 cm (Kopfdurchmesser) r e c h t s von der Schlauchmitte, wanderte S_r ins Unendliche, d.h. dass dann überhaupt kein Wert für S_r mehr bestimmbar war. Und entsprechendes galt für S_l , wenn der Ausgangspunkt nicht viel über 20 cm l i n k s von der Schlauchmitte lag.

Eine Erklärung dafür, dass S_r und St_r sowie S_l und St_l am kleinsten sind, wenn sie für die Schlauchmitte bestimmt werden, ist nicht einfach. Sicher sind diese kleinsten Werte aber damit in Zusammenhang zu bringen, dass bei Aufklopfen auf die Schlauchmitte der Schall in die M e d i a n e b e n e verlegt wird. Wie bekannt, haben wir bezüglich dieser auch sonst Bewusstsein, und offenbar wird dieses dann bei der Schallokalisation in die Medianebene mitverwandt — eine Hilfe, die man bisher viel zu wenig beachtet hat, und auf die hier deshalb nachdrücklich hingewiesen sei.

II. Versuchssreihe

Schallerzeugung durch Tonfrequenzgenerator

Bei den bisherigen Versuchen wurde der zu hörende Schall immer durch Aufklopfen auf den Schlauch erzeugt. Zwar erfolgte dieses in einigen Versuchsreihen so, dass ich eine Nadel einfach mit der Hand gegen den Schlauch führte, in anderen Versuchsreihen dagegen dienten zu dem Aufklopfen der Nadel einfache mechanische Vorrichtungen. Auch wurde in einem Teil der Versuchsreihen stärker und in einem anderen Teil schwächer aufgeklopft. Doch bekam ich auf diese Weise nie Änderungen in dem Versuchsausfall. Das heißt aber noch nicht, dass die Schallgebung darauf überhaupt keinen Einfluss hat. Dass diese keinen Einfluss hat, ist sogar recht unwahrscheinlich, und so bin ich dann daran gegangen, die bisher benutzte Apparatur umzubauen. Dabei ging ich wie folgt vor (Abb.6):

Zur Schallerzeugung benutzte ich jetzt einen Tonfrequenzgenerator (Philips GM 2307) mit angeschlossenem Lautsprecher. Letzterer war in einer schalldichten Kiste untergebracht und stand da durch ein geeignetes, ihm fest aufsitzendes Übergangsstück mit einem Schlauch in Verbindung, der aus der Kiste austrat. Der Schlauch führte über einen Glashahn zu einem T-förmigen Metallrohr, über dessen beide freie Schenkel zwei seitliche Rohre gestülpt waren. In ihnen konnte das T-Stück hin- und hergeschoben werden. Die Rohre standen mit Schläuchen in Verbindung, die zu den Ohren der Vp. bzw. zu einem Kondensatormikrophon führten, so dass der vom Lautsprecher abgegebene Schall an den Schlauchenden sowohl gehört als auch über einen Kathodenstrahloszillographen registriert werden konnte. Bei geschlossenem Glashahn hörte man an den Schlauchenden nichts. Um wieder nur kurz dauernden Schall herzustellen, verfuhr ich dann so, dass ich den Glashahn rasch öffnete und wieder schloß. Durch Verschieben des T-Stückes konnte ich an den Schlauchenden auch wieder Laufzeitdifferenzen herstellen.

Diese Versuchsanordnung hat gegenüber der früher gebrauchten vor allem den großen Vorteil, dass jetzt mit reinen, beliebig wählbaren Frequenzen gearbeitet werden konnte. Darüber hinaus war jetzt auch die Intensität des Schalls fein abstufbar.

Hielt ich alle sonstigen Versuchsbedingungen konstant und änderte ich allein die Intensität, fand ich in einem weiten Intensitätsbereich keine Änderungen von S_r und St_r sowie S_l und St_l und damit auch keine Änderung in den Laufzeitdifferenzen. Es entspricht das dem, was auch schon in den obigen Aufklopffversuchen gefunden wurde. Doch stiegen all die genannten Werte bei extrem schwachem Schall deutlich an.

Änderte ich dagegen die Frequenz, so fand ich unter sonst gleichen Versuchsbedingungen, dass sich S_r und St_r sowie S_l und St_l immer stark mitänderten (Tab. 4). Die Werte dafür waren in

Tabelle 4

Einfluss der Frequenz
(Länge des Schlauches 2 mm)

		S_r	St_r	S_l	St_l
		(in mm)	(in mm)	(in mm)	(in mm)
Versuch 1					
Freq.	50 Hz	51"	$\pm 24,0$	42	$\pm 19,0$
Freq.	100 "	39	$\pm 13,5$	37	$\pm 12,5$
Freq.	200 "	21	$\pm 9,5$	22,5	$\pm 8,5$
Freq.	400 "	13	$\pm 3,0$	10,5	$\pm 3,5$
Freq.	500 "	11	$\pm 3,5$	5,5	$\pm 3,5$

		S_r (in mm)	St_r (in mm)	S_l (in mm)	St_l (in mm)
Versuch 2					
Freq.	50 Hz	59	$\pm 19,0$	51	$\pm 19,5$
Freq.	100 Hz	40	$\pm 17,5$	31	$\pm 17,5$
Freq.	200 Hz	19	$\pm 11,0$	23	$\pm 10,0$
Freq.	400 Hz	14	$\pm 2,5$	9	$\pm 5,0$
Freq.	500 Hz	7,5	$\pm 2,5$	4	$\pm 3,0$
Versuch 3					
Freq.	50 Hz	55	$\pm 29,0$	54	$\pm 17,0$
Freq.	100 Hz	53	$\pm 15,5$	31	$\pm 15,0$
Freq.	200 Hz	33,5	$\pm 17,0$	20,5	$\pm 13,0$
Freq.	400 Hz	15	$\pm 8,0$	15	$\pm 8,0$
Freq.	500 Hz	13	$\pm 6,0$	8,5	$\pm 2,5$
Mittelwerte					
Freq.	50 Hz	55	± 24	49	$\pm 18,5$
Freq.	100 Hz	44	$\pm 15,5$	33	$\pm 15,0$
Freq.	200 Hz	24,5	$\pm 12,5$	22	$\pm 10,5$
Freq.	400 Hz	14	$\pm 4,5$	11,5	$\pm 5,5$
Freq.	500 Hz	10,5	$\pm 4,0$	6,0	$\pm 3,0$

dem hier untersuchten Bereich stets bei niederen Frequenzen am höchsten und nahmen dann mit wachsender Frequenz zuerst rasch, dann langsam ab. Die errechneten Mittelwerte für S_r und S_l (vgl. dazu auch Abb. 7) waren bei 50 Hz etwa 6-7 mal so groß wie bei 500 Hz; weiterhin war die mittlere Streuung bei 50 Hz ungefähr die 6-fache wie bei 500 Hz. Eine Erklärung für diese Mitänderung der genannten Größen mit der Frequenz ist nicht einfach. Doch steht sie wohl sicher damit im Zusammenhang, dass bei den hohen Frequenzen die Anstiegsteilheit der Schallreize größer ist, und dass es auf diese Anstiegsteilheit immer besonders ankommt. Die in den Versuchen bei 500 Hz gewonnenen Werte für S_r und St_r sowie S_l und St_l entsprechen in ihrer Größe ungefähr den oben in den Aufklopf-Versuchen gefundenen, woraus folgt, dass da wohl vornehmlich Frequenzen um 500 Hz untersucht wurden.

Machte ich in der neuen Apparatur den Schlauch verschieden lang, fand ich unter sonst gleichen Bedingungen keine oder doch nur sehr geringe Änderungen von S_r und St_r sowie S_l und St_l mit der Schlauchlänge — ganz im Gegensatz zu den obigen Aufklopfversuchen, in denen sich die genannten Größen mit der Schlauchlänge immer sehr stark änderten. Der Befund war anfänglich nicht wenig überraschend und es wurde so zunächst an Versuchsfehler gedacht. Doch fand ich dann bei Nachprüfungen immer wieder, dass sich S_r und St_r sowie S_l und St_l bei einer Schallerzeugung durch Aufklopfen auf den Schlauch stark änderten, nicht dagegen bei einer Schallerzeugung durch den Tonfrequenzgenerator und Lautsprecher. Offenbar ging der andere Versuchsausfall also mit der Schallerzeugung zusammen, bei der im einen Fall immer Geräusche, d.h. Frequenz-Gemische, im anderen Fall aber Töne mit nur einer konstanten Frequenz entstanden.

Nun ist bekannt, dass allgemein verschiedenen Frequenzen sehr unterschiedlich absorbiert werden, und zwar hohe mehr als niedere. Für die von mir verwand-

ten Schläuche habe ich die Absorption auch selbst näher untersucht und dabei gefunden, dass sie immer recht beträchtlich war. So z.B. wurde ein Ton von 500 Hz, der an den Enden des 2 m langen Schlauches gut hörbar war, an den Enden des 10 m langen Schlauches eventuell kaum noch und an den Enden des 20 m langen Schlauches überhaupt nicht mehr gehört. Ein Ton von 50 Hz dagegen war an den Enden von Schläuchen von 2, 10 und 20 m Länge ohne allzu große Intensitätsunterschiede zu hören. Mittels Kondensatormikrophon und Kathodenstrahloszillograph habe ich in den Schläuchen die Absorption von Tönen verschiedener Frequenz auch leicht objektiv beobachten und messen können, wobei sich ebenfalls zeigte, dass sie je nach Frequenz sehr unterschiedlich war, und dass sie bei langem Schlauch und hohen Frequenzen in der Tat bis zu einer völligen Auslöschung des Tons führen konnte.

In den obigen Aufklopfversuchen kamen mit wachsender Schlauchlänge hohe Frequenzen also immer weniger an den Schlauchenden an. Da nun aber hohe Frequenzen mit kleinen und niedere Frequenzen mit großen Werten von S_r und St_r sowie S_l und St_l gekoppelt sind (Tab. 4), ist jetzt ohne weiteres verständlich, warum in den Aufklopfversuchen — und zwar auch nur in den Aufklopfversuchen — diese Werte mit der Schlauchlänge ansteigen mussten.

Ähnlich wie in Schläuchen verschiedener Länge werden auch in Schläuchen mit verschiedener Füllung die einzelnen Frequenzen unterschiedlich absorbiert. Allerdings habe ich das selbst nicht mehr näher untersucht. Doch zweifle ich nicht, dass diese unterschiedliche Absorption auch hier für den Versuchsausfall von entscheidender Bedeutung ist.

Zusammengefaßt kommt es für die Schalllokalisierung in dem Pohl'schen Schlauchversuch also nicht nur auf Zeitlaufdifferenzen, sondern auch noch sehr auf die jeweiligen Schallfrequenzen an. Werden diese irgendwie geändert — sei es, dass man wie in den Tonfrequenzgenerator-Versuchen überhaupt nur eine Frequenz verwendet und diese dann ändert, oder dass man wie in den Aufklopf-Versuchen von Frequenz-Gemischen ausgeht und dann durch unterschiedliche Absorption im verschieden langen Schläuchen, in verschieden gefüllten Schläuchen usw. an den Schlauchenden verschiedene Frequenzen ankommen lässt — wird ceteris paribus auch die Schalllokalisierung anders. Auch sieht man, dass bei dieser ein Weniger an Schallfrequenz durch ein Mehr an Zeitlaufdifferenz ausgeglichen werden kann und umgekehrt, d.h. dass sich Zeitlaufdifferenzen und Schallfrequenzen wechselseitig vertreten können. Verglichen mit den Schallfrequenzen sind die gehörten Schallintensitäten in dem Schlauchversuch von viel geringerer Bedeutung. Dass sie überhaupt eine Rolle spielen, geht aber bereits daraus hervor, dass man bei extrem schwachem Schall deutlich lokalisiert. Doch kann dieses Wenige an Intensität ebenfalls durch ein Mehr an Zeitlaufdifferenz wettgemacht werden, d.h. dass sich auch Zeitlaufdifferenzen und Schallintensitäten wechselseitig vertreten können. Zum anderen geht das aber auch aus dem oben beschriebenen Abklemmversuch hervor, in dem der einseitig geschwächte Schall durch eine Vergrößerung der Laufzeitdifferenz hat wieder ausgeglichen werden können.

In dem Schlauchversuch werden zur Schalllokalisierung also nicht Laufzeitdifferenzen schlechthin, sondern immer nur Laufzeitdifferenzen für einen Schall bestimmter Frequenz und Intensität verwandt. Anders ausgedrückt heißt das, dass es bei der Schalllokalisierung nicht auf Laufzeitdifferenzen allein ankommt, sondern auch noch auf den Schall als solchen, und dass die erforderlichen Laufzeitdifferenzen letzthin ganz von der Beschaffenheit des Schalls abhängen.

Z u s a m m e n f a s s u n g

Der von R.W. Pohl angegebene Schlauchversuch, der zur Stütze der Zeit-Theorie des Richtungshörens dienen soll, ist in seiner üblichen Durchführung, d.h. bei einfachem Aufklopfen auf den Schlauch beiderseits seiner Mitte, viel komplizierter als das zunächst den Anschein hat. Es wird gezeigt, dass für den Versuchsausfall die L ä n g e des Schlauches eine Rolle spielt, indem mit dieser die gemessene Laufzeitdifferenz zuerst rasch dann langsamer ansteigt; gleichzeitig nimmt die Streuung der dafür gemessenen Werte zu. Für Schläuche verschiedener W e i t e und M a - t e r i a l b e s c h a f f e n h e i t ist es schwieriger, eindeutige Unterschiede in der Laufzeitdifferenz festzustellen. Ändert man die Schlauchweite aber nur einseitig, derart dass man den Schlauch an einer Seite an umschriebener Stelle leicht zusammendrückt, ändert sich die Laufzeitdifferenz immer stark; auch wird dann wieder die Streuung der dafür gemessenen Werte größer. Sodann ändern sich die Laufzeitdifferenz und ihre Streuungswerte mit der F ü l l u n g des Schlauches. Bringt man statt Luft (Schallgeschwindigkeit 340m/sec) z.B. Wasserstoff (Schallgeschwindigkeit 1200m/sec) in den Schlauch, nehmen die in Millimeter Schlauchlänge gemessenen Schwellenwerte zu, doch nicht im Verhältnis der Schallgeschwindigkeiten, sondern erheblich mehr.

Die Erklärung für diese Befunde ist folgende: Es wird gezeigt, dass die gemessenen Laufzeitdifferenzen immer in hohem Maß von der jeweiligen S c h a l l f r e q u e n z und in geringerem Maß auch von der jeweiligen S c h a l l i n t e n s i t ä t abhängen. Aus den bei Aufklopfen auf den Schlauch entstehenden Frequenz-Gemischen werden nun in verschieden langen und verschieden gefüllten Schläuchen unterschiedliche Frequenzen absorbiert; damit kommen nicht mehr die gleichen Frequenzen an den Schlauchenden an und daher dann die anderen Laufzeitdifferenzen. Bei kurzen Schläuchen kann auch noch eine Rolle spielen, dass der Tastsinn der Haut des Gehörganges bzw. der Ohrmuschel miterregt wird. In einem Schlauch, der einseitig an umschriebener Stelle verengt wird, ist die andere Laufzeitdifferenz vornehmlich auf die an der verengten Seite verminderte Schallintensität zurückzuführen.

Allgemein kommt es in dem Schlauchversuch für die Schallokalisation also nicht auf Laufzeitdifferenzen allein an, sondern auch noch auf den Schall als solchen. Von großem Einfluss auf die gemessenen Laufzeitdifferenzen ist auch, dass die Schallokalisation beiderseits der Medianebene erfolgt.

L i t e r a t u r

- 1) R.W. Pohl. Einführung in die Mechanik und Wärmelehre,
10. und 11. Aufl. Berlin, Göttingen 1947, S. 242
- 2) E.v.Skramlik. Zeitschr. f. Biologie 107, 241 (1945)
- 3) Bergmann-Schäfer, Lehrb. der Experimentalphysik 1.Bd.
2. und 3. Aufl. 1945, S. 381

L e b e n s l a u f

Am 16.8.1925 wurde ich als Sohn des Lehrers K. Kleinhanß und seiner Ehefrau Anna geb. Dudenhöfer in Oppenheim/Rhein geboren. Ich besuchte zunächst die Volksschule in Oppenheim, danach das Realgymnasium in Mainz. Am 1.8.1942 wurde ich zur Wehrmacht einberufen. Im Sommersemester 1943 immatrikulierte ich als Wehrmachtsangehöriger bei der medizinischen Fakultät in Berlin. Im Frühjahr 1945 legte ich die ärztliche Vorprüfung an der Universität Prag ab. Anschließend geriet ich in sowjetrussische Gefangenschaft, aus der ich erst 1949 wieder entlassen wurde. Nach meiner Rückkehr immatrikulierte ich an der Universität Mainz und legte dort im Herbst 1952 das ärztliche Staatsexamen ab.

(Gerfried Kleinhanß)

Zahl der Urteile

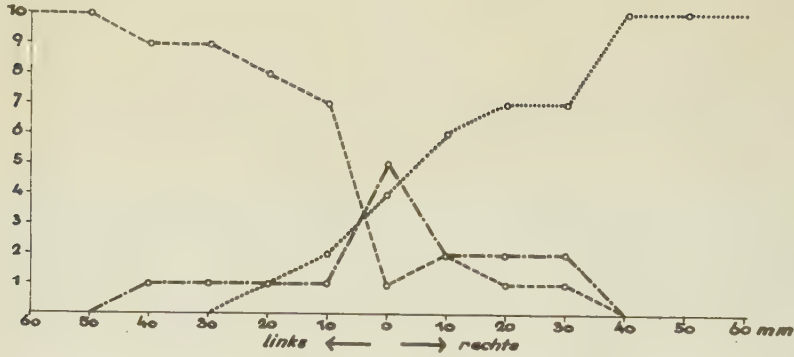


Abb. 1

Zahl der Urteile

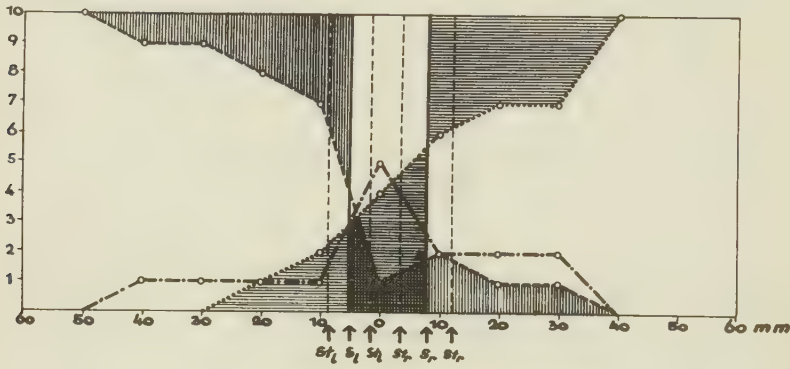


Abb. 2

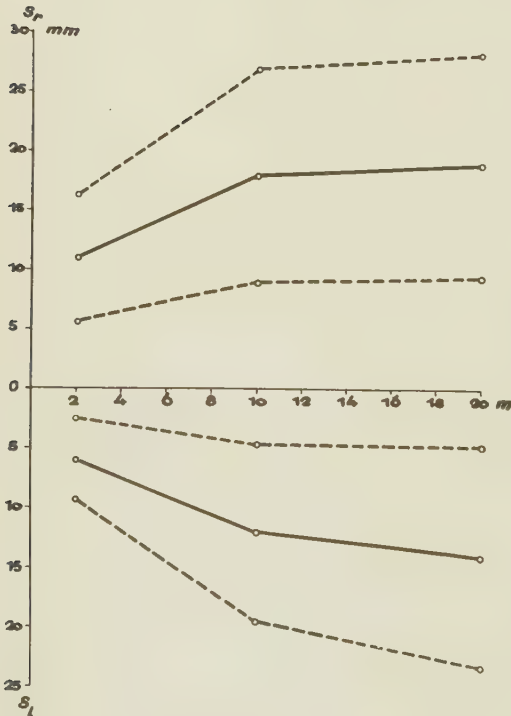


Abb. 3

Zeichnerische Darstellung
der errechneten Mittelwer-
te aus Tab. 1

Abszisse: Schlauchlänge
Ordinate: Nach oben S_r & St_r ,
Nach unten S_l & St_l

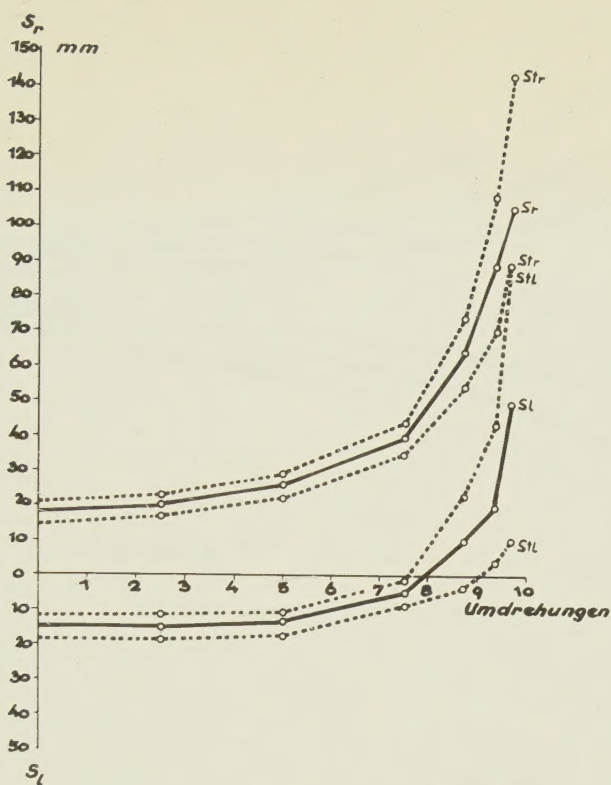


Abb. 4

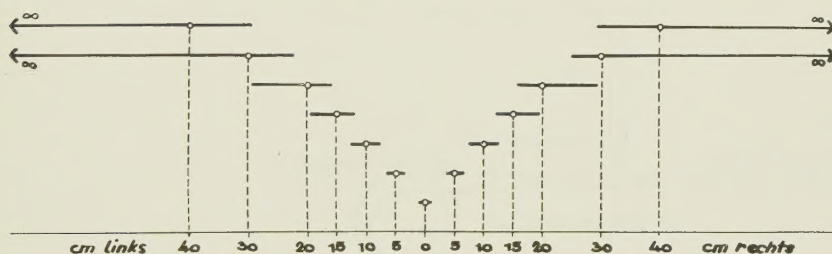


Abb. 5

S_r und S_l für Festpunkte,
die mehr oder weniger weit
rechts bzw. links von der
Schlauchmitte lagen.

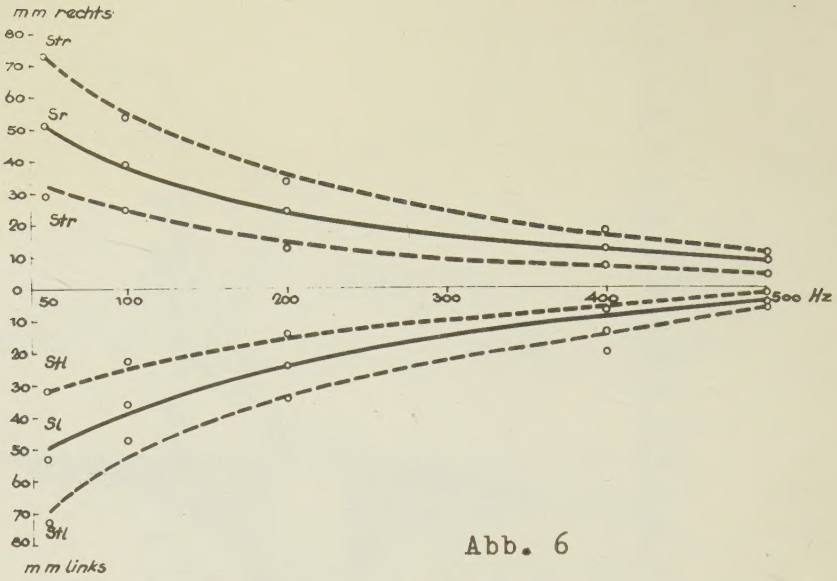


Abb. 6

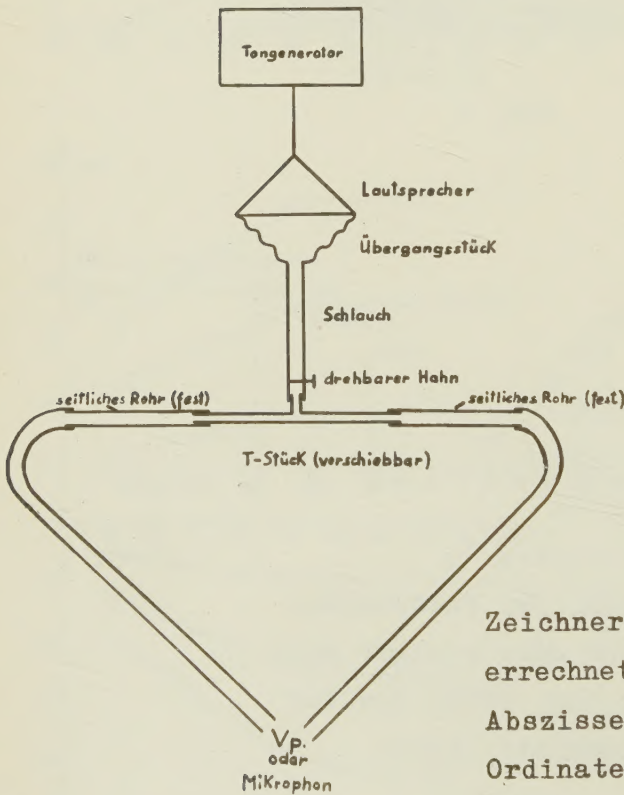


Abb. 7

Zeichnerische Darstellung der errechneten Mittelwerte aus Tab.4

Abszisse: Frequenz in Hz

Ordinate: Nach oben S_r und St_r

Nach unten S_l und St_l

